

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240385

孤岛直流微电网的多储能 SOC 稳定均衡控制策略

宋昕一, 徐永海, 袁 敞, 陈怡薇, 孙曙光

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 孤岛直流微电网一般需要配置多组储能单元保证系统稳定性。为实现多储能单元在充放电过程中荷电状态 (state-of-charge, SOC) 均衡, 防止过充过放加速老化, 提出了一种改进 SOC 稳定均衡控制策略。首先, 利用幂指数函数嵌套反正切函数构建下垂系数与 SOC 的关系, 合理设计下垂系数中加速因子与收敛因子参数使 SOC 快速达到均衡状态, 实现自适应控制。其次, 引入母线电压与虚拟压降二次补偿, 减少母线电压波动同时忽略线路阻抗影响, 提高电流分配精度。然后, 通过频域根轨迹分布, 讨论该策略控制参数对系统稳定的影响。最后, 仿真结果验证了所提控制策略在正常充放电、负载或光伏功率波动、储能单元额定容量不同工况下均能更好地实现 SOC 快速稳定均衡, 电流精确分配, 母线电压偏差较小且稳定性更强。

关键词: 孤岛直流微电网; 多储能单元; 下垂系数; 二次补偿; SOC 均衡

Multi-storage SOC stabilization and equalization control strategy for islanded DC microgrids

SONG Xinyi, XU Yonghai, YUAN Chang, CHEN Yiwei, SUN Shuguang

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Islanded DC microgrids generally need to be configured with multiple energy storage units to ensure the stability of the system. To realize state-of-charge (SOC) equalization of multiple energy storage units during charging and discharging, and to prevent overcharging and over-discharging from accelerating the aging, an improved SOC stabilization and equalization control strategy is proposed. First, the power finger function nested inverse tangent function is used to construct the relationship between droop coefficient and SOC, and the parameters of acceleration factor and convergence factor in the droop coefficient are reasonably designed to make the SOC reach the equilibrium state quickly and realize adaptive control. After that, the influence of the control parameters of this strategy on system stability is discussed. Finally, simulation results verify that the proposed control strategy can better achieve fast and stable equalization of SOC, accurate current distribution and smaller bus voltage deviation with better stability under normal charging and discharging, load or PV power fluctuation, and with different rated capacities of energy storage units.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2601403).

Key words: islanded DC microgrid; multiple energy storage units; droop coefficient; secondary compensation; SOC equalization

0 引言

直流微电网相较交流微电网具有控制简单、电能转换效率高, 可为偏远地区或海岛提供电力供应等优势, 近年来逐渐成为研究热点^[1-3]。由于以光伏为主的分布式能源往往具有随机波动与间歇发电的特点, 为保证系统稳定运行, 孤岛直流微电网通常会配置储能单元来平抑系统功率波动^[4-7]。单一的储

能单元难以支撑大容量的功率变化, 实际应用中通常会采用一定容量的多组储能单元通过双向 DC-DC 变换器并联至直流母线协调运行^[8-11]。而多组储能单元之间由于线路阻抗、分配顺序等因素往往会导致出力不均, 出现过充过放的问题, 从而降低储能设备寿命, 影响系统稳定性, 因此需要对各储能单元输出功率合理分配, 实现 SOC 稳定均衡控制^[12-15]。

目前的功率分配方法主要分为主从控制、平均电流控制与下垂控制^[16-17]。其中具备即插即用特性的下垂控制被广泛应用在直流微电网中, 传统下

基金项目: 国家重点研发计划项目资助 (2021YFB2601403)

下垂控制方法存在电流分配精度低、母线电压偏差大、SOC 均衡速度慢等问题。针对该问题,国内外学者对改进下垂控制展开大量研究。文献[18]通过指数函数构建下垂系数与 SOC 的关系,在确保输出功率限制的前提下实现 SOC 均衡,但未考虑不同容量储能单元的功率分配问题。对此,文献[19]引入容量调节因子,各储能单元根据自身 SOC 自适应调节下垂系数,按容量合理分配功率。文献[20]设置储能单元初始下垂系数与容量成反比,从而保证各储能单元 SOC 最终保持一致,同时引入电压补偿环节,减轻因下垂控制引起母线电压跌落的影响,提升系统稳定性。为实现自适应下垂控制,文献[21-22]提出一种 SOC 幂函数改进下垂策略,下垂系数与 SOC 的 n 次幂成反比,然而该控制随着 SOC 差异越小,均衡速度越慢。对于上述采用固定调节因子出现调速较慢的问题,文献[23]根据 SOC 差值关系设定动态调节因子,当差值较大时,调节因子起到提升响应速度的作用,当差值趋于 0 时,调节因子放大差异,加快均衡速度。文献[24-25]采用将幂函数与指数函数结合的方式,幂函数增大 SOC 差异,指数函数保证下垂曲线平滑,实现自适应下垂控制。与上述策略不同的是,文献[26]利用反正切函数特性构建下垂变化系数,限制储能单元最大输出功率,确保系统在正常设计范围内运行。但该方法需要确定每个储能单元下垂系数的上下限数值,增加了系统复杂性。文献[27]在此基础上进行简化,将反正切函数和幂函数结合,加快均衡速度。但上述研究未考虑线路阻抗对负荷分配精度的影响。对此,文献[28]提出一种考虑时变线阻的改进控制,通过将线路阻抗信息引入下垂系数,保证系统在阻抗突变化等极端情况下仍能稳定运行,但该方法平衡后 SOC 存在一定偏差。

基于上述分析,为实现多储能单元 SOC 均衡,本文在传统下垂控制的基础上,提出一种幂指数函数嵌套反正切函数的改进下垂控制策略,充分利用不同函数的优点,合理设计参数,实现不同容量的储能单元 SOC 快速均衡控制。同时引入电压二次补偿控制,使母线电压稳定在额定值;引入动态电流均分控制消除线路阻抗,精准分配负荷电流。此外,通过对系统的频域分析证明控制稳定性。最终在 Matlab/Simulink 平台搭建相关模型验证所提控制策略的正确性与有效性。

1 孤岛直流微电网结构

孤岛直流微电网结构如图 1 所示,根据功率流动方向可分为 3 个模块。

(1) 分布式电源: 单向输入型,正常运行时,光伏发电单元工作在最大功率跟踪状态,提供直流电能。

(2) 储能系统: 双向输入输出型,储能具有功率双向流动的功能,可实现充放电控制,一般由多个独立的储能单元并联组成。

(3) 负载: 单向输出型,直流微电网中可包含直流和交流两种类型的负荷,均需要微电网提供功率以维持运行。

系统内各模块的功率关系为

$$P_{\text{ESS}} = P_{\text{DG}} - P_{\text{load}} \quad (1)$$

式中: P_{ESS} 为储能系统总平抑功率; P_{DG} 为分布式电源输出功率; P_{load} 为负载总功率。

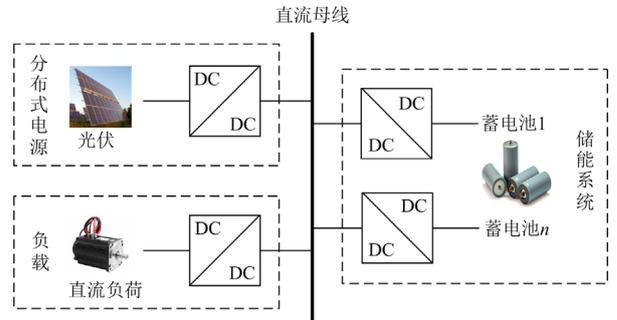


图 1 孤岛直流微电网结构图

Fig. 1 Structural diagram of islanded DC microgrid

2 基于 SOC 均衡的改进下垂控制

2.1 传统下垂控制

直流微电网通常采用下垂控制进行负荷分配,传统 $I-U$ 下垂控制表达式为

$$U_{\text{dci}} = U_{\text{dcref}} - i_{\text{dci}} R_i \quad (2)$$

式中: U_{dci} 、 i_{dci} 、 R_i 分别为第 i 个储能单元的输出电压、输出电流、下垂系数; U_{dcref} 为直流母线电压额定参考值。

图 2 是两个储能单元并联至直流母线的系统等效电路。图中: $R_{\text{line}i}$ 、 $R_{\text{line}j}$ 分别为第 i 、 j 个储能单元至直流母线处的线路阻抗; R_{load} 为负载阻抗; U_{bus} 为输出母线电压。

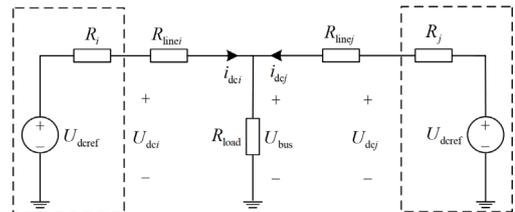


图 2 储能系统等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of energy storage system

由图 2 可得电路 KVL 方程如式(3)所示。

$$\begin{cases} U_{dcref} = U_{bus} + R_i i_{dci} + R_{linei} i_{dci} \\ U_{dcref} = U_{bus} + R_j i_{dcj} + R_{linej} i_{dcj} \end{cases} \quad (3)$$

2.1.1 线路阻抗影响

由式(3)可得关系式(4)。

$$\frac{i_{dci}}{i_{dcj}} = \frac{R_j + R_{linej}}{R_i + R_{linei}} = \frac{R_j}{R_i} + \frac{R_{linej} - \frac{R_j}{R_i} R_{linei}}{R_i + R_{linei}} \quad (4)$$

显然, 输出电流的比值不仅与下垂系数有关, 还受到线路阻抗影响。由于实际线路阻抗受环境影响, 阻值容易变化, 导致传统下垂控制无法按比例实现电流精准分配。只有当 $\frac{R_j}{R_i} = \frac{R_{linej}}{R_{linei}}$ 时, 输出电流

满足与下垂系数成反比的固定比例。此外, 由于下垂控制的存在, 系统会产生一定的电压跌落, 导致母线电压往往无法稳定在额定值。

2.1.2 容量差异影响

为获取储能单元荷电状态, 可采用安时积分法进行估算, 其表达式为

$$S_{oci} = S_{oci}(0) - \frac{\int i_{dci} dt}{C_i} \quad (5)$$

式中, S_{oci} 、 $S_{oci}(0)$ 、 C_i 分别为第 i 个储能单元当前 SOC 状态、初始 SOC 状态与当前容量。

对式(5)进行求导, 可得 S'_{oci} 为

$$S'_{oci} = -\frac{i_{dci}}{C_i} \quad (6)$$

由式(6)可知, SOC 的变化率与储能单元的输出电流和容量有关。在稳定状态下, 各单元的 SOC 变化率须相等, 将式(4)代入式(6)进一步分析可得

$$\frac{S'_{oci}}{S'_{ocj}} = \frac{(R_j + R_{linej})C_j}{(R_i + R_{linei})C_i} \quad (7)$$

通过上述分析可知, 若想实现 SOC 均衡以及负荷电流精准分配, 则必须消除线路阻抗与储能单元自身容量差异的影响。

2.2 SOC 均衡控制

传统下垂控制的下垂系数一般为常数, 若储能单元初始 SOC 不同, 则无法实现 SOC 自主均衡。为解决传统下垂控制存在的问题, 本文提出一种改进 SOC 下垂控制策略, 采用幂指数函数嵌套反正切函数: 幂函数加快 SOC 均衡速度; 指数函数使下垂曲线趋于平滑, 易于参数设计; 反正切函数限制输出功率在允许范围内, 多种函数特性结合实现储能均衡速度大幅提升的同时保证输出功率合理分配, 母线电压稳定。所提控制策略的改进下垂系数表达式为

$$R_i = \begin{cases} R_0 \frac{C_{\max}}{C_i} e^{\frac{k \cdot \arctan[(S_{oci})^n - (S_{ocavg})^n]}{\pi/2}}, & i_{dci} < 0 \\ R_0 \frac{C_{\max}}{C_i} e^{\frac{k \cdot \arctan[(S_{ocavg})^n - (S_{oci})^n]}{\pi/2}}, & i_{dci} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: R_0 为初始下垂系数; S_{ocavg} 为储能系统 SOC 平均值; C_{\max} 为储能单元中的最大容量; k 为加速因子; n 为收敛因子; $i_{dci} < 0$ 表示储能单元处于充电状态, $i_{dci} > 0$ 表示储能单元处于放电状态。

改进下垂系数中 $\frac{C_{\max}}{C_i}$ 为容量调节因子, 联立式(2)、式(5)、式(8)可得储能单元充电时 SOC 表达式为

$$S_{oci} = S_{oci}(0) - \frac{\int \frac{U_{dcref} - U_{dci}}{k \cdot \arctan[(S_{oci})^n - (S_{ocavg})^n]} dt}{R_0 C_{\max}} \quad (9)$$

由式(9)可知, SOC 表达式中消除了变量 C_i , 解决了因储能单元自身容量差异对 SOC 均衡产生的影响。同时结合式(8)可知, 在充电或放电情况下储能单元容量越大, R_i 越小, 输出电流越大。

为证明所提控制策略能够实现下垂系数 R_i 随 SOC 自适应调整, 以储能单元充电状态为例, 通过式(6)可得两个容量均为 C_{bat} 的储能单元 SOC 变化率差值 $\Delta S'_{ocij}$ 为

$$\Delta S'_{ocij} = S'_{oci} - S'_{ocj} = \frac{i_{dcj} - i_{dci}}{C_{bat}} \quad (10)$$

指数函数 e^x 的一阶泰勒展开可近似为

$$e^x \approx 1 + x \quad (11)$$

联立式(2)、式(8)、式(10)、式(11)可得

$$\Delta S'_{ocij} = \frac{U_{dcref} - U_{dci}}{R_0 C_{bat}} \cdot \frac{k}{\pi/2} \cdot [\arctan((S_{ocj})^n) - \arctan((S_{ocavg})^n) - \arctan((S_{oci})^n) - \arctan((S_{ocavg})^n)] \quad (12)$$

可以得出, 当两储能单元初始 SOC 处于 $S_{oci} > S_{ocj}$ 时, 其 SOC 变化率差值 $\Delta S'_{ocij}$ 小于 0, 结合式(10)说明第 i 个单元的 SOC 变化率 S'_{oci} 小于第 j 个单元的 S'_{ocj} , 因此两个储能单元的 SOC 差值将逐渐减小直至相同。综上所述, 改进下垂控制策略通过动态调整 R_i 从而调节充放电速度, 实现储能单元间 SOC 快速均衡。当充电时, SOC 越大, 其 R_i 随之增大, 输出电流越小; SOC 越小, 其 R_i 随之减小, 输出电流越大。放电与充电状态相反。

2.3 母线电压补偿

下垂控制的引入以及线路阻抗的存在, 必然会产生一定的电压跌落。为保证系统稳定性, 本文采用 PI 控制器进行母线电压补偿, 利用储能模块平均输出电压代表母线电压水平, PI 调节生成补偿量, 使母线电压稳定在额定值。其中, 平均输出电压 U_{dcavg} 表达式为

$$U_{dcavg} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m U_{dci} \quad (13)$$

式中, m 为储能单元总数量。

生成的电压补偿量 ΔU_i 如式(14)所示。

$$\Delta U_i = G_{PI1}(U_{dcref} - U_{dcavg}) \quad (14)$$

式中, G_{PI1} 为母线电压补偿的 PI 控制器传递函数。

2.4 动态电流均分

由上述分析可知, 传统下垂控制无法解决因线路阻抗引起负荷电流无法精确分配的问题。为提升系统精确度, 提出加入动态电流均分控制器, 通过将 i_{dci} 与 R_i 相乘得到因引入下垂系数造成的虚拟压降 U_{vi} , 将其与平均虚拟压降 U_{avg} 作差后经 PI 调节得到虚拟压降补偿量 ΔU_{vi} , 具体表达式为

$$\Delta U_{vi} = G_{PI2}(U_{avg} - U_{vi}) \quad (15)$$

式中, G_{PI2} 为动态电流均分的 PI 控制器传递函数。

通过 PI 调节, 消除了线路阻抗的影响, 使储能单元能够按比例实现电流精准分配。

综上所述, 所提改进下垂控制在传统下垂控制的基础上重新构建下垂系数与 SOC 的关系, 实现自适应调节。此外引入电压补偿与动态均流二次控制。最后通过电压电流双闭环输出 PWM 驱动信号, 实现储能系统及直流微电网稳定运行。储能系统基于 SOC 均衡的改进下垂控制结构如图 3 所示。最终下垂控制表达式如式(16)所示。

$$U_{refi} = U_{dcref} - R_i i_{dci} + \Delta U_i + \Delta U_{vi} \quad (16)$$

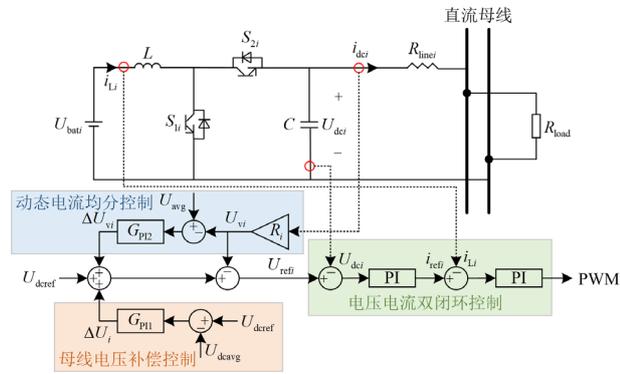


图3 储能系统改进下垂控制框图

Fig. 3 Improved sag control block diagram of energy storage system

3 下垂系数动态特性与参数设计分析

3.1 下垂系数动态特性分析

根据式(8)可知, R_i 与 S_{oci} 、 k 、 n 取值直接关联, 为进一步分析下垂系数动态特性, 绘制放电时 R_i 在不同变量取值下的曲面如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, R_i 曲面图相对平滑, S_{ocavg} 与 S_{oci} 之间差异越大, R_i 受 k 和 n 的影响就越大, 当 $S_{ocavg} < S_{oci}$ 时, k 和 n 取值越大, R_i 越小; 当 $S_{ocavg} > S_{oci}$ 时, k 值越大, R_i 越大; 当 $S_{ocavg} > S_{oci}$ 时, n 值越大, R_i 越小。因此, 分析 R_i 动态性能可得 k 和 n 取值不应过大, 参数需要结合实际电路情况合理选取, 详见 3.2 节。

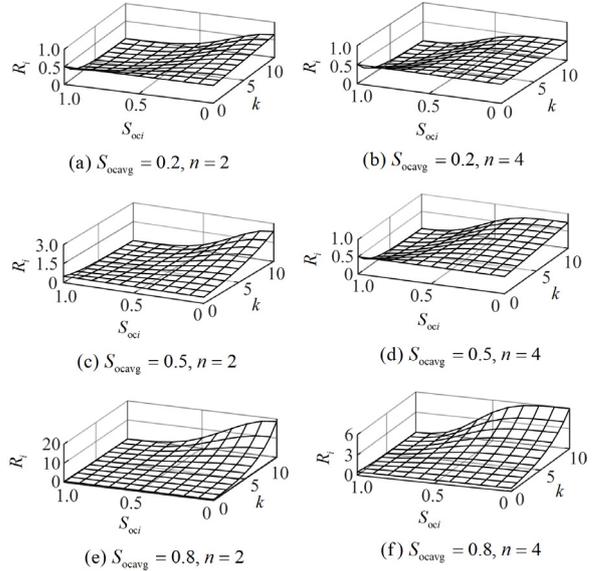


图4 R_i 在不同变量取值下的曲面图

Fig. 4 Surface plots of R_i for different values of the variables

3.2 参数设计规则

改进下垂控制的主要目的为加快 SOC 均衡速度, 图 5 与图 6 分别分析了不同 k 、 n 在固定初始 SOC 差值下的曲线变化速率。

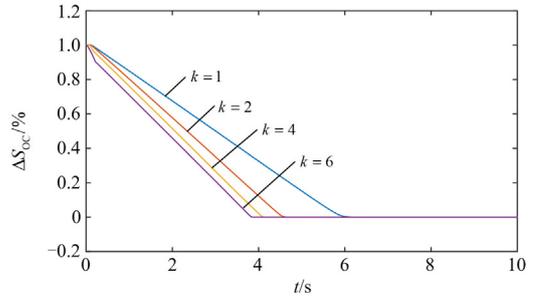


图5 不同 k 值下的 ΔSOC 差值变化曲线

Fig. 5 ΔSOC variation curves for different k values

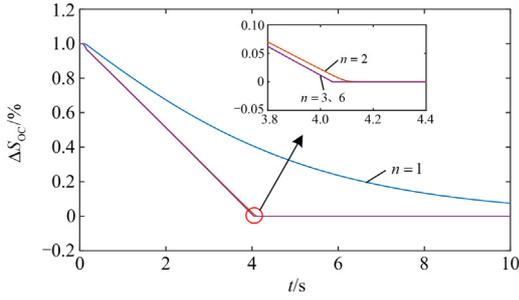
图 6 不同 n 值下的 ΔS_{OC} 差值变化曲线Fig. 6 ΔS_{OC} variation curves for different n values

图 5 以两个储能单元初始 SOC 差值 1% 为例, 固定 $n=2$, 设置加速因子 k 分别为 1、2、4 和 6。观察 ΔS_{OC} 随 k 取值不同的变化情况可知, 当 $k=1$ 时, 运行约 6.1 s 时实现均衡; 当 $k=6$ 时, 运行至约 3.9 s 时 $\Delta S_{OC} \approx 0$ 。可以明显看出 k 值越大, SOC 均衡速度越快。

ΔS_{OC} 随收敛因子 n 不同的变化曲线如图 6 所示。当 $n=1$ 时, 运行 10 s 后 $\Delta S_{OC} \approx 0.111$; 当 $n=2$ 时, 运行至 4.18 s 时 $\Delta S_{OC} \approx 0$; 之后增大 n 值分别为 3 和 6, SOC 均衡速度均未有较大提升。

此外, 为保证系统稳定运行, 母线电压一般要求运行在 $0.95U_{dcref} \sim 1.05U_{dcref}$, 避免电压偏差过大, 所以对于 R_i 取值范围应该满足式(17)。

$$0 < R_{linei} < R_i \leq \frac{\Delta U_{max}}{I_{max}} = \frac{0.05U_{dcref} \times U_{dcref}}{P_{max}} \quad (17)$$

式中: ΔU_{max} 为母线电压最大偏差值; I_{max} 为储能单元输出电流最大值; P_{max} 为储能单元最大输出功率。

以放电情况为例, 储能单元 SOC 正常工作范围为 $[0.2, 0.8]$, 则 S_{ocavg} 工作范围为 $[0.2, 0.8]$, $(S_{ocavg})^n - (S_{oci})^n$ 工作范围为 $[-0.6, 0.6]$, 计算可得

$$\arctan[(S_{ocavg})^n - (S_{oci})^n] / \frac{\pi}{2} \in (-0.344, 0.344) \quad (18)$$

考虑两个相同容量的储能单元时, 若设定 $U_{dcref} = 400$ V, $P_{max} = 2$ kW, 初始下垂系数 $R_0 = 0.5$, 联立式(8)、式(17)和式(18)可得, $k < 6.044$ 。因此, 在母线电压偏差约束条件下, k 值应小于 6.044, 与 n 值无较大联系。

通过上述分析并结合下垂系数动态特性可得, 在当前系统参数下, $k=6$ 、 $n=2$ 时均衡效果最佳。

4 稳定性分析

下垂控制的引入会对系统稳定性造成影响, 以包含两个同容量储能单元的系统为例, 进行稳定性分析。根据式(16)和图 3 可得, 储能系统控制结构

如图 7 所示。其中: SOC 的估算等效为惯性环节; $G_w(s)$ 为一阶电流低通滤波环节传递函数; ω_c 为滤波环节截止频率; $G_c(s)$ 为输出电压闭环传递函数, 可近似为 1。

虚拟压降 U_{vi} 的表达式为

$$U_{vi} = i_{dci} \cdot R_i \cdot \frac{1}{s+1} \cdot \frac{\omega_c}{\omega_c + s} \quad (19)$$

其中

$$i_{dci} = \alpha_i U_{dci} - \lambda U_{dcj} \quad (20)$$

式中, α_i 、 λ 为反映输出电流与输出电压之间关系的系数。

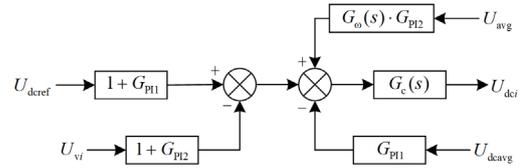


图 7 储能系统控制结构图

Fig. 7 Energy storage system control structure diagram

联立式(13)一式(16)、式(19)和式(20)可得系统闭环传递函数为

$$\frac{U_{dci}}{U_{dcref}} = \frac{(1 + G_{P11}) \cdot A(s)}{as^4 + bs^3 + cs^2 + ds + f} \quad (21)$$

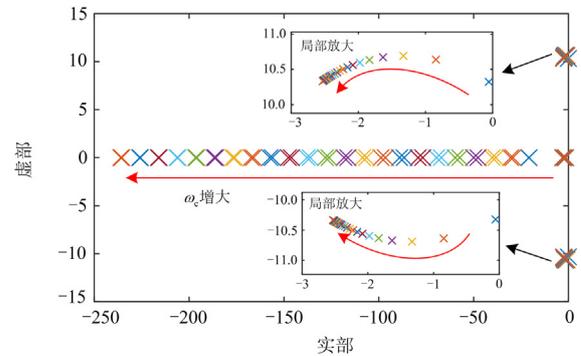
式中, $A(s)$ 、 a 、 b 、 c 、 d 和 f 的表达式见附录 A。

设定系统相关参数值如表 1 所示, 将表 1 数据代入式(21), 绘制截止频率与下垂系数变化下的根轨迹如图 8 所示。

表 1 用于分析稳定性的系统参数

Table 1 System parameters for analyzing stability

参数	数值	参数	数值
R_{linei}/Ω	0.3	$\omega_c/(\text{rad/s})$	20~240
R_{linej}/Ω	0.6	R_i	0.5~4
R_{load}/Ω	20	$G_{P11}(s)$	$0.1+5/s$
—	—	$G_{P12}(s)$	$1+50/s$

(a) $R_i = 1$, ω_c 增大

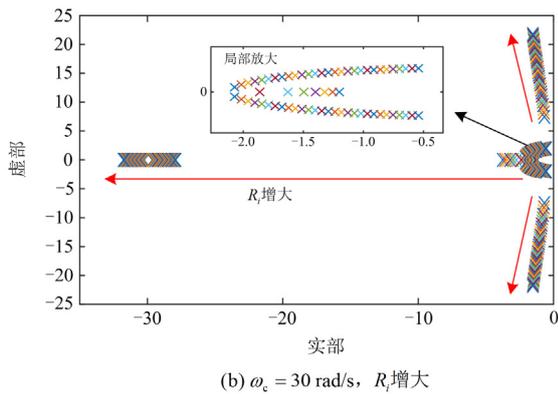


图 8 不同参数变化时的根轨迹图

Fig. 8 Root locus diagram with different parameter variations

由图 8 可知，当截止频率和下垂系数不断变化时，系统的闭环传递函数极点始终在左半平面，并逐渐远离右半平面，即系统始终保持稳定。

5 仿真分析

为验证所提控制策略的有效性和可行性，采用 Matlab/Simulink 平台搭建如图 1 所示的孤岛直流微电网系统，其中，光伏处于 MPPT 工作模式，储能系统由两个独立的储能单元通过双向 DC-DC 变换器并联构成。系统参数具体如下：储能单元初始 SOC 分别为 75%、70%，容量为 0.5 Ah；变换器至直流母线电压的线路阻抗分别为 0.3 Ω、0.4 Ω；直流母线电压额定值为 400 V。

本文进行储能系统在稳定充电、稳定放电、负载扰动以及光伏功率波动 4 种不同工况下仿真验证，同时选取不同控制策略：文献[18]为基于指数函数的下垂控制方法，文献[27]为结合反正切函数和幂函数的自适应下垂控制，对比验证本文所提控制策略的有效性。

5.1 稳定充电

当光伏输出功率大于负载功率时，储能系统处于充电状态维持功率平衡。在稳定充电工况下设置光伏输出功率 $P_{DG} = 1 \text{ kW}$ ，负载 $R = 640 \text{ } \Omega$ 。图 9—图 11 分别为本文与文献[18]、文献[27]所提控制策略在充电状态下对应 SOC、输出电流与直流母线电压的仿真波形。

观察图 9 和图 10 可知，1 号储能单元初始 SOC 较大，对应下垂系数较大，输出电流较小；相反，2 号储能单元输出电流较大。本文控制策略下两者输出电流最大差值约 4.1 A，随着储能单元的 SOC 差值越来越小，在 $t = 23.3 \text{ s}$ 时 S_{oc1} 、 S_{oc2} 趋于一致，且 I_1 、 I_2 数值相等。而由图 9(b)、图 9(c)和图 10 可知，

文献[18]所提控制策略输出电流最大差值约 3.2 A，在 $t = 31.5 \text{ s}$ 时 SOC 才近似相等，且 SOC 之间仍存在微小差值；在文献[27]策略控制下设置初始下垂系数较大，因此其输出电流数值较小，该控制中通过设置变加速因子不断增大来加快收敛速度，最后 SOC 在 $t = 31.73 \text{ s}$ 时可视为均衡，输出电流稳定在 -2.1 A 。

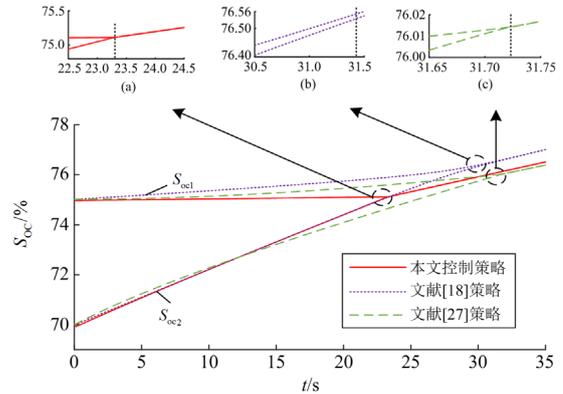


图 9 储能系统稳定充电下 SOC 仿真波形

Fig. 9 SOC simulation waveforms under stable charging of energy storage system

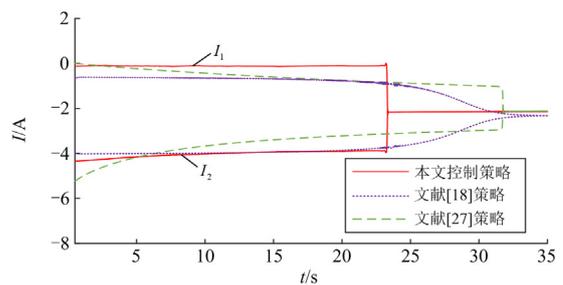


图 10 储能系统稳定充电下输出电流仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms of output current under stable charging of energy storage system

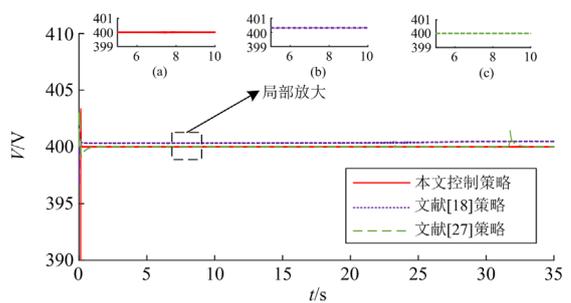


图 11 储能系统稳定充电下直流母线电压仿真波形

Fig. 11 Simulation waveforms of DC bus voltage under stable charging of energy storage system

由图 11(a)可知，在本文策略控制下母线电压始终稳定保持在额定 400 V；在文献[18]策略控制下母

线电压波形如图 11(b)所示, 最终母线电压稳定在 400.4 V, 存在较小偏差; 图 11(c)中, 在文献[27]策略控制下的母线电压前期虽能保持在 400 V, 但在 $t = 31.73$ s 的均衡时刻出现约 1.5 V 的电压变化。

5.2 稳定放电

当光伏输出功率小于负载功率时, 储能系统处于放电状态弥补功率缺额。本工况下设置光伏输出功率 $P_{DG} = 1$ kW, 负载 $R = 73 \Omega$ 。图 12—图 14 分别为本文与文献[18]、文献[27]所提控制策略在放电状态下对应 SOC、输出电流与直流母线电压的变化波形。

结合图 12(a)和图 13 可知, 本文采用幂指数函数结合反正切函数可以使 SOC 快速达到均衡状态, 在 $t = 9.5$ s 时 SOC 已近似均衡, $\Delta S_{OC} \approx 0.03\%$; 在 $t = 10.3$ s 左右, SOC 以及输出电流由相互交错状态逐渐趋于一致, 实现稳定均衡。同时, 由图 14(a)可知, 母线电压在均衡时刻最大偏差仅为 0.4 V, 系统恢复稳定后母线电压保持在额定值 400 V。而从图 12(b)、图 12(c)可以明显看出, 文献[18]与文献[27]所提控制策略均衡速度较慢。在文献[18]控制下, 由于 SOC 逐渐接近, 输出电流数值也逐渐趋于一致, 导致变

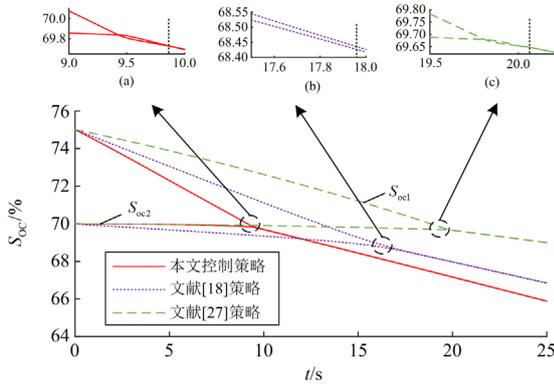


图 12 储能系统稳定放电下 SOC 仿真波形

Fig. 12 SOC simulation waveforms under stable discharge of energy storage system

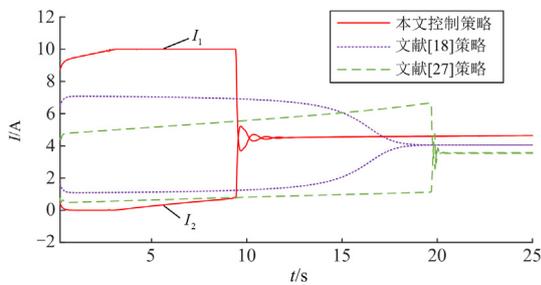


图 13 储能系统稳定放电下输出电流仿真波形

Fig. 13 Simulation waveforms of output current under stable discharge of energy storage system

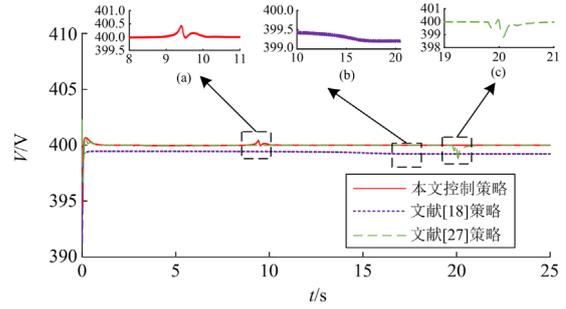


图 14 储能系统稳定放电下直流母线电压仿真波形

Fig. 14 Simulation waveforms of DC bus voltage under stable discharge of energy storage system

化速率缓慢, 在 18 s 左右才完成均衡。文献[27]中输出电流数值差异较小, 导致 SOC 差值在 $t = 20$ s 时近似趋于 0。此外, 由图 14(b)可知, 文献[18]控制下母线电压与额定值的偏差约为 0.9 V, 均衡后母线电压为 399.1 V, 无法满足额定运行; 文献[27]母线电压在均衡时刻降至 398.5 V, 两者电压稳定性均低于本文控制。

综上对比分析, 文献[18]与文献[27]控制策略均衡速度较慢且存在母线电压偏差, 本文所提控制策略在加快 SOC 均衡速度的同时减小了母线电压偏差, 偏差量小于 0.1%, 具有更好的动态性能。

5.3 负载扰动

为验证系统在发生负载扰动下的 SOC 均衡、电流分配以及母线电压效果, 设置储能单元容量分别为 0.5 Ah、0.2 Ah; 光伏输出功率 $P_{DG} = 2$ kW 保持不变。负载变化情况为: 前 6 s, 母线电压并联接入 $R_1 = 80 \Omega$ 、 $R_2 = 200 \Omega$ 两个电阻, 储能系统处于放电状态弥补缺额; 6~12 s, 切除 R_1 负载, 仅 R_2 工作, 储能系统转为充电吸收功率; 12~20 s, R_1 恢复并联工作, 由充电状态切换回放电状态。图 15—图 17 分别为本文与文献[18]、文献[27]所提控制策略在该工况下的各变量仿真结果。

由图 15 可知, 3 种控制方法下储能单元均能根据负载变化完成充放电状态转换, SOC 差值逐渐减小。但在本文控制方法下 SOC 均衡速度会明显快于对比方法, 在 12 s 负载恢复正常工作时, 本文 SOC 差值已由 5% 降至 0.45%, 并在 14 s 左右 SOC 均衡, 同时由图 16(a)可知, 储能单元输出电流实现按容量比分配, $I_1 : I_2 \approx 2.5 : 1$, 符合容量大的储能单元输出电流较大的理论。而结合图 15 和图 16 仿真波形可知, 文献[18]控制策略无法实现不同容量的储能单元 SOC 均衡, 其 SOC 始终存在差距; 文献[27]控制策略虽能实现储能单元 SOC 均衡, 但均衡速度较慢, 与本文所提控制策略的均衡速度相差约 11 s。

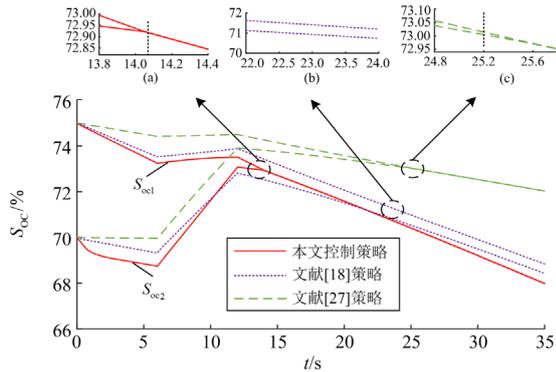


图 15 储能系统负载扰动下 SOC 仿真波形

Fig. 15 SOC simulation waveform under load disturbance of energy storage system

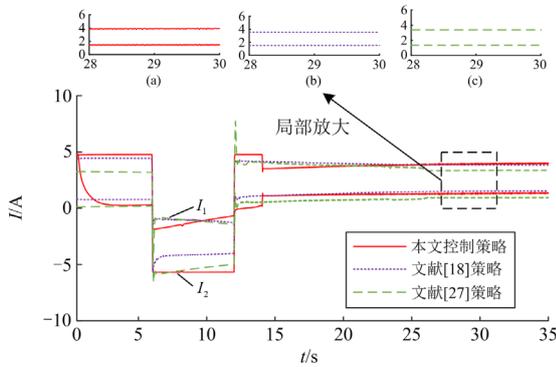


图 16 储能系统负载扰动下输出电流仿真波形

Fig. 16 Simulation waveform of output current under load disturbance of energy storage system

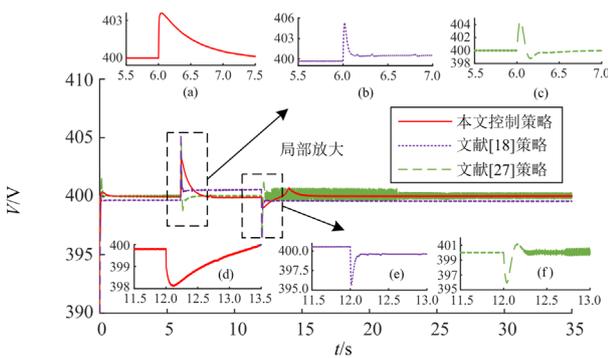


图 17 储能系统负载扰动下直流母线电压仿真波形

Fig. 17 Simulated waveforms of DC bus voltage under load disturbance of energy storage system

由于系统在 6 s 时切除负载 R_1 ，根据图 17(a)—图 17(c)可知，此时本文所提控制策略的母线电压产生约 3 V 的电压波动，文献[18]与文献[27]母线电压分别产生约 5.3 V、4.6 V 的波动；由图 17(d)—图 17(f)可知，12 s 接入负载时，3 种控制方法分别产

生约 2 V、4.4 V、4 V 的电压波动，因为在均衡过程中储能单元下垂系数为相对固定数值，SOC 均衡后下垂系数将变为稳态值，因此本文控制方法在均衡时刻母线电压产生约 0.4 V 的较小波动，但较快恢复至额定电压 400 V，文献[18]母线电压始终存在较小偏差，最终稳定在 399.5 V。文献[27]母线电压则在均衡过程中存在约 1 V 的电压振荡，无法稳定在额定值。结合以上分析可知，本文所提控制策略在负载扰动下母线电压偏差更小、稳定性更强。

5.4 光伏功率波动

为进一步验证系统在光伏功率发生波动下的动态性能，设置两个储能单元初始 SOC 分别为 70%、60%，容量分别为 0.8 Ah、0.4 Ah，负载 $R = 130 \Omega$ 。初始状态光伏输出功率 $P_{DG} = 2.3 \text{ kW}$ ，28 s 时光照强度下降， P_{DG} 变为 0.3 kW。图 18—图 20 分别为本文所提控制策略与文献[18]、文献[27]所提控制策略在该工况下对应 SOC、输出电流与直流母线电压的变化波形。

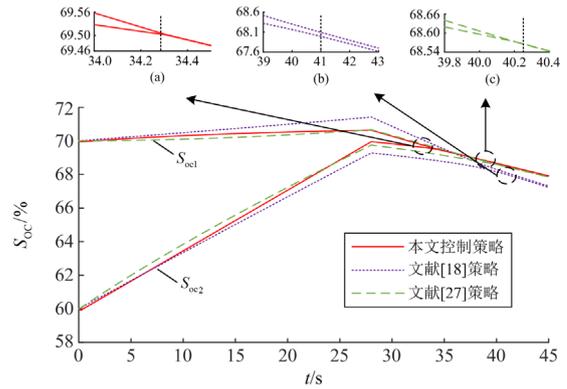


图 18 储能系统光伏功率波动下 SOC 仿真波形

Fig. 18 SOC simulation waveform under photovoltaic power fluctuation of energy storage system

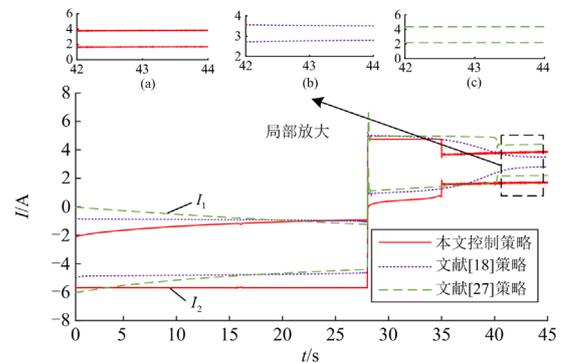


图 19 储能系统光伏功率波动下输出电流仿真波形

Fig. 19 Simulation waveforms of output current under photovoltaic power fluctuation of energy storage system

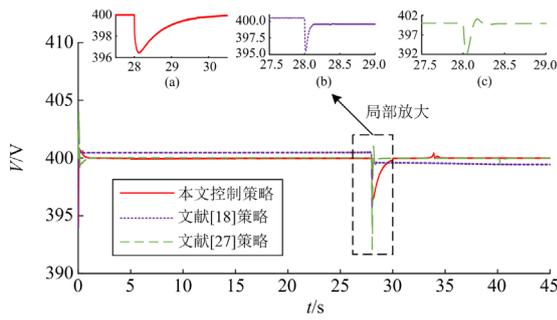


图 20 储能系统光伏功率波动下直流母线电压仿真波形
Fig. 20 Simulation waveforms of DC bus voltage under photovoltaic power fluctuation of energy storage system

从图 18、图 19 中可以看出, 0~28 s 时由于光伏功率充足, 储能进行充电, 输出电流的差异使两者 SOC 差值不断减小, 28 s 后光伏功率下降, 储能放电支撑负载正常运行, 输出电流方向发生变化, 但 SOC 差值仍在减小。本文控制策略下储能单元 SOC 在 $t = 34.3$ s 时完成均衡, 且放电电流按容量成正比分配, 满足 $I_1 : I_2 \approx 2 : 1$ 。光伏波动变化时刻母线电压下降约 3 V 左右, 但在电压二次补偿下快速恢复至额定值; 而从图 18(b)、图 19(b)可知, 文献 [18] 控制策略输出电流无法按容量成比例分配, 导致 SOC 在 $t = 41$ s 时仍存在微小差距无法彻底均衡, 同时由图 20(b)可以看出, 该控制均衡前后母线电压始终无法保持在额定值, 且光伏波动时电压跌落至 395.4 V。文献 [27] 策略控制下 SOC 最终在 40.3 s 左右实现均衡, 母线电压在光伏功率变化时跌落至 392 V, 系统电压稳定性较差。

6 结论

本文针对孤岛直流微电网多储能单元 SOC 均衡问题, 提出一种改进 SOC 下垂控制策略, 具体工作如下。

1) 针对传统下垂控制 SOC 均衡问题, 采用幂指数嵌套反正切函数重新构建下垂系数与 SOC 的关系, 实现自适应下垂控制, 提高 SOC 均衡速度的同时保证输出功率合理分配。

2) 考虑母线电压偏差与电流分配精度问题, 分别设计二次补偿控制, 消除电压跌落以及线路阻抗对均衡控制的影响。

3) 利用曲面图分析下垂系数动态特性, 结合曲线法与相关约束条件给出系统参数设计规则。并通过根轨迹分布证明了所提控制策略下系统稳定性。

4) 仿真结果表明, 本文所提控制策略对比相关方法在正常充放电、负载或光伏功率波动、储能单元额定容量不同等工况下均能更好地实现 SOC 快

速稳定均衡、电流精确分配且母线电压偏差较小, 稳定性更强, 验证了所提控制策略的有效性。

附录 A

系统闭环传递函数中相应系数表达式为

$$A(s) = 2(s+1)(s+\omega_c) \cdot [2(s+1)(s+\omega_c) + 2R_i\omega_c(1+G_{PI2})(\alpha_i + \lambda)] \quad (A1)$$

$$a = 4 + 4G_{PI1} \quad (A2)$$

$$b = 2[b_{11} + b_{22} + 2(\omega_c + 1)G_{PI1}] \quad (A3)$$

$$c = 2(a_{11} + a_{22} + 2\omega_c G_{PI1}) + b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21} + 2G_{PI1}R\omega_c(\alpha_i + \alpha_j + 2\lambda)(1 + G_{PI2}) \quad (A4)$$

$$d = b_{11}a_{22} + b_{22}a_{11} - b_{12}a_{21} - b_{21}a_{12} \quad (A5)$$

$$f = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \quad (A6)$$

其中:

$$a_{11} = 2\omega_c - R_i\omega_c G_{PI2}(\alpha_j - \lambda) + \omega_c G_{PI1} + 2R_i\omega_c(1 + G_{PI2})\alpha_j$$

$$a_{12} = -R_i\omega_c G_{PI2}(\alpha_i - \lambda) + \omega_c G_{PI1} - 2R_i\omega_c(1 + G_{PI2})\lambda$$

$$a_{21} = -R_i\omega_c G_{PI2}(\alpha_j - \lambda) + \omega_c G_{PI1} - 2R_i\omega_c(1 + G_{PI2})\lambda$$

$$a_{22} = 2\omega_c - R_i\omega_c G_{PI2}(\alpha_i - \lambda) + \omega_c G_{PI1} + 2R_i\omega_c(1 + G_{PI2})\alpha_i$$

$$b_{11} = 2 + 2\omega_c - R_i\omega_c G_{PI2}(\alpha_j - \lambda) + G_{PI1}(1 + \omega_c)$$

$$b_{12} = -R_i\omega_c G_{PI2}(\alpha_i - \lambda) + G_{PI1}(1 + \omega_c)$$

$$b_{21} = -R_i\omega_c G_{PI2}(\alpha_j - \lambda) + G_{PI1}(1 + \omega_c)$$

$$b_{22} = 2 + 2\omega_c - R_i\omega_c G_{PI2}(\alpha_i - \lambda) + G_{PI1}(1 + \omega_c)$$

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{R_{linej} + R_{load}}{R_{linei}R_{linej} + R_{linei}R_{load} + R_{linej}R_{load}} \\ \alpha_j = \frac{R_{linei} + R_{load}}{R_{linei}R_{linej} + R_{linei}R_{load} + R_{linej}R_{load}} \\ \lambda = \frac{R_{load}}{R_{linei}R_{linej} + R_{linei}R_{load} + R_{linej}R_{load}} \end{cases}$$

参考文献

- [1] 张宇, 王洪希, 王璞. 交直流混合微电网互联变流器微分平坦控制[J]. 中国电力, 2022, 55(7): 102-109, 120. ZHANG Yu, WANG Hongxi, WANG Pu. Flatness-based control of AC/DC hybrid microgrid interconnected converter[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 102-109, 120.
- [2] 陈景文, 周媛, 李晓飞, 等. 光储直流微网混合储能控制策略研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 14-20, 87. CHEN Jingwen, ZHOU Yuan, LI Xiaofei, et al. Hybrid energy storage control strategy of optical storage DC microgrid[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 14-20, 87.
- [3] ZULFIQAR A, YACINE T, LE Q N H, et al. Fault management in DC microgrids: a review of challenges, countermeasures, and future research trends[J]. IEEE Access, 2021, 9: 128032-128054.

- [4] 董继军, 陈浩, 周雪松, 等. 直流微电网孤岛运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 115-121.
DONG Jijun, CHEN Hao, ZHOU Xuesong, et al. Research on control strategy of a DC microgrid in isolated operation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 115-121.
- [5] 武海涛, 庞春林, 张宁宁. 兼顾提升功率分配精度与抑制电压偏差的自适应下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 109-120.
WU Haitao, PANG Chunlin, ZHANG Ningning. Adaptive sag control with improved power distribution accuracy and voltage deviation suppression[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 109-120.
- [6] YANG Jingyu, YANG Tongguang, LUO Longfu, et al. Tracking-dispatch of a combined wind-storage system based on model predictive control and two-layer fuzzy control strategy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 974-989.
- [7] 侯磊, 马涛, 蔡毅, 等. 孤岛型多能互补系统的规划与运行优化模型研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 108-116.
HOU Lei, MA Tao, CAI Yi, et al. Research on optimization of planning and operation for islanded integrated energy system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 108-116.
- [8] 陈勃旭, 崔炜, 陈宇, 等. 分布储能直流微电网中多储能荷电均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 111-120.
CHEN Boxu, CUI Wei, CHEN Yu, et al. Charge balance control strategy for multiple energy storage in a distributed energy storage DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 111-120.
- [9] ZENG Yuji, ZHANG Qinjin, LIU Yancheng, et al. State-of-charge dynamic balancing strategy for distributed energy storage system in DC shipboard microgrid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 133.
- [10] 梁海峰, 丁政, 李鹏. 基于改进一致性算法的孤岛直流微电网储能系统分布式控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 59-71.
LIANG Haifeng, DING Zheng, LI Peng. Distributed control strategy of an energy storage system in an isolated DC microgrid based on an improved consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 59-71.
- [11] 韩翔宇, 纽春萍, 何海龙, 等. 基于优化增量电导法的温差发电最大功率点跟踪策略[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 240-249.
HAN Xiangyu, NIU Chunping, HE Hailong, et al. Maximum power point tracking strategy for thermoelectric generation based on optimized incremental conductance method[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 240-249.
- [12] 曾国辉, 朱相臣, 曾志伟, 等. 具有公共低压直流母线电压支撑功能的储能单元 SOC 自动均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7160-7170.
ZENG Guohui, ZHU Xiangchen, ZENG Zhiwei, et al. Energy storage unit state-of-charge automatic equalization control strategy with common LVDC bus voltage support function[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7160-7170.
- [13] 米阳, 钱翌明, 张浩杰, 等. 考虑通信异常的直流微电网储能单元分布式协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 50-59.
MI Yang, QIAN Yiming, ZHANG Haojie, et al. Distributed coordinated control of a DC microgrid energy storage unit considering abnormal communication[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 50-59.
- [14] 王波, 张占营, 张霄, 等. 直流微电网分布式储能系统精确电流分配策略[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 96-103, 112.
WANG Bo, ZHANG Zhanying, ZHANG Xiao, et al. Accurate current sharing strategy for distributed energy storage system in DC microgrids[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 96-103, 112.
- [15] 马海宁, 王鲁杨, 仇成, 等. 直流微电网不同荷电状态多储能系统分布式控制[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 87-95.
MA Haining, WANG Luyang, QIU Cheng, et al. Research on distributed control of multiple energy storage systems with different SOC in DC microgrid[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 87-95.
- [16] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84, 344.
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84, 344.
- [17] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [18] 柴秀慧, 张纯江, 柴建国, 等. 改进互联通信荷电状态下下垂控制及功率均衡优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(16): 3365-3374.
CHAI Xiuhui, ZHANG Chunjiang, CHAI Jianguo, et al. Improved interconnected communication state of charge droop control and power balance optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(16): 3365-3374.

- [19] 代广贵, 何晋, 张博嘉. 考虑不同容量的储能 SOC 均衡与功率分配策略[J]. 电力建设, 2023, 44(6): 12-22.
DAI Guanggui, HE Jin, ZHANG Bojia. SOC balancing and power distribution strategies considering different capacities of energy storage[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6): 12-22.
- [20] 魏茂华, 杨苓, 翁亮涛, 等. 考虑容量差异的孤岛直流微网分布式储能单元 SOC 均衡策略[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-29[2024-01-23]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.271>.
WEI Maohua, YANG Ling, WENG Liangtao, et al. SOC balancing strategy for distributed energy storage units in isolated DC microgrids considering capacity differences[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University: 1-29[2024-01-23]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.271>.
- [21] 林嘉伟, 王志新, 张永. 独立直流微电网中考虑不同容量的分布式储能系统能量控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 139-146.
LIN Jiawei, WANG Zhixin, ZHANG Yong. Energy control strategy of distributed energy storage system considering different capacities in isolated DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 139-146.
- [22] 陈景文, 刘嘉欣, 张文倩. 基于一致性算法的直流微网多储能 SoC 均衡策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(9): 30-38.
CHEN Jingwen, LIU Jiaxin, ZHANG Wenqian. State of charge equalization strategy of multi-energy storage in dc microgrid based on consensus algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(9): 30-38.
- [23] 明远山, 胡慧慧, 刘凯旋, 等. 孤岛模式下直流微网中储能单元 SOC 均衡控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 57-64.
MING Yuanshan, HU Huihui, LIU Kaixuan. Research on SOC balance control strategy of energy storage unit in DC microgrid in island mode[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 57-64.
- [24] 张良, 闫凯宏, 冷祥彪, 等. 基于 SOC 下垂控制的独立直流微电网协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 87-97.
ZHANG Liang, YAN Kaihong, LENG Xiangbiao, et al. Research on coordinated control strategy of an autonomous DC microgrid based on SOC droop control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 87-97.
- [25] QI Nan, FANG Wei, WANG Wei, et al. SoC balancing method for energy storage systems in DC microgrids using simplified droop control[J]. Journal of Power Electronics, 2021, 21(8): 1-13.
- [26] 王建元, 李南南. 基于一致性算法的直流微电网分布式储能系统能量控制策略[J]. 东北电力大学学报, 2023 43(2): 73-81.
WANG Jianyuan, LI Nannan. Energy control strategy of DC microgrid distributed energy storage system based on consensus algorithm[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(2): 73-81.
- [27] 张汀, 雷勇, 王小昔. 考虑 SOC 均衡的直流微网储能系统控制策略研究[J]. 电源技术, 2023, 47(8): 1099-1104.
ZHANG Ting, LEI Yong, WANG Xiaoxi. Research on control strategy of DC microgrid energy storage system considering SOC equilibrium[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(8): 1099-1104.
- [28] 卢志刚, 苗泽裕, 蔡瑶. 考虑时变线阻的多储能 SOC 稳定均衡控制策略[J/OL]. 高电压技术: 1-17[2024-01-23]. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20230066.
LU Zhigang, MIAO Zeyu, CAI Yao. Stable equilibrium control strategy for multi-energy storage SOC considering time-varying linear resistance[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-17[2024-01-23]. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20230066.

收稿日期: 2024-04-02; 修回日期: 2024-07-25

作者简介:

宋昕一(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为直流微电网技术; E-mail: xinyisong7@163.com

徐永海(1966—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电能质量分析与控制、新能源电力系统。E-mail: yonghaixu@263.net

(编辑 张颖)